

# Utilisation de capteurs à réseaux de Bragg pour la mesure *in-situ* de déformée d'une structure alvéolaire élaborée en matériaux composite

Marc Anduze<sup>1</sup>, Alain Bonnemaison<sup>1</sup>, Vincent Boudry<sup>1</sup>, Mickael Frodin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CNRS/IN2P3, Ecole Polytechnique, LLR UMR7638, 91128 Palaiseau

anduze@llr.in2p3.fr

## ***Use of Bragg grating sensors for in-situ deformation measurement of an alveolar structure made of composite***

*The use of structures made of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) for the design of future detectors in particle physics allows compactness and the possibility to integrate the absorber material while minimizing the dead zones. The deformations of such structures could be monitored by the use of optical fiber Bragg grating embedded directly within them. A demonstrator equipped with such sensors was made and tested on a specific set-up. The design, test results and comparison with numerical simulations are detailed in this paper.*

## **1. Introduction**

Les futurs collisionneurs électron-positron à haute énergie, tels que l'ILC [1] ou le CEPC [2] chinois, seront des projets d'envergure mondiale similaire au LHC, actuellement exploité au CERN à Genève. Ils vont nécessiter des détecteurs de haute performance, faisant l'objet d'un programme de R&D décennal, et en particulier des calorimètres Electromagnétiques (ECAL) et Hadroniques (HCAL) à haute granularité étudiés par la collaboration CALICE [3]. Un premier prototype de ECAL Silicium-Tungstène (SiW-ECAL) a déjà démontré le potentiel d'un tel calorimètre à satisfaire aux exigences de performances de physique des futures machines, en validant certains aspects des concepts de mécanique et d'instrumentation, lors de plusieurs campagnes de tests en faisceau au DESY, au CERN et au FNAL [4].

Ce type de détecteur impose des défis d'ingénierie et d'instrumentation, en raison des performances attendues, de la réduction drastique des zones mortes (non instrumentées), de la densité et du nombre très important de voies de lecture (100 millions au total, un facteur 1000 par rapport aux expériences du LHC). Il est envisagé de réaliser un ECAL sur la base d'une structure alvéolaire autoportante en fibre de carbone/époxy et tungstène, dans laquelle seront ensuite insérés des éléments de détection sous forme de cassettes intégrant des matrices de diode de silicium avec leur électronique de lecture et le système de refroidissement (Figure 1). Le projet est maintenant entré dans une phase de validation de concept, ce qui nécessite la mise en œuvre de grands prototypes technologiques pour confirmer la faisabilité.

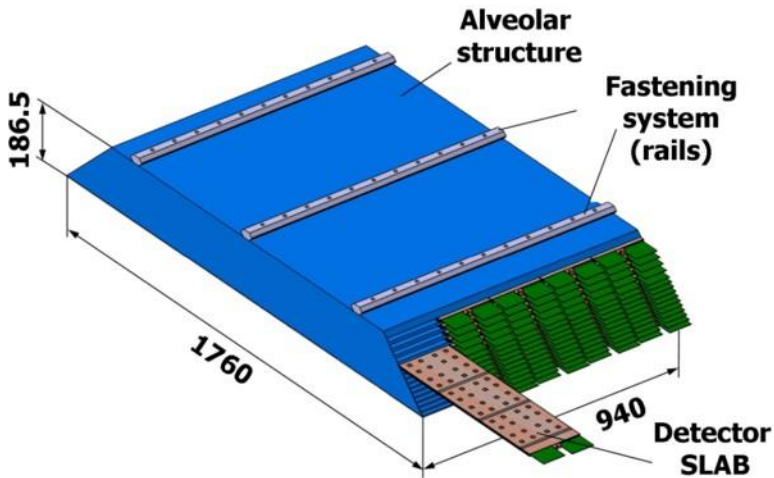


Figure 1 : Présentation d'un module du SiW-ECAL montrant la structure alvéolaire FC/W (en bleu) et l'insertion des éléments de détection.

Il est prévu d'instrumenter 40 modules tels que présentés en figure 1 dans la partie centrale de l'expérience ; d'un poids unitaire de 1200 kg, les modules seront accrochés par les rails à l'intérieur d'un prisme horizontal octogonal formé par les détecteurs extérieurs. Une précision millimétrique sur le positionnement des éléments est demandée en tout temps pour les analyses de physique.

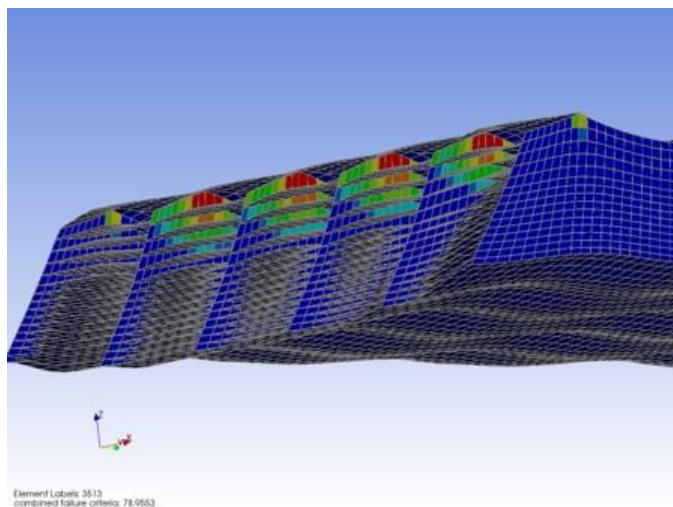
À cette fin nous envisageons d'utiliser des fibres optiques comportant des Réseaux de Bragg (RB). Ce type de capteurs à faible encombrement peut être un bon remplaçant des extensomètres usuels. Un réseau de Bragg peut être décrit comme une succession de franges sombres et brillantes. Gravé dans le cœur d'une fibre, il délivre une information qui relie une sollicitation thermomécanique à une variation de longueur d'onde de Bragg notée  $\Delta\lambda_b$ . Dans des conditions isothermes, nous pouvons alors supposer que les mesures représentent l'allongement de la fibre, et donc l'allongement de la pièce dans laquelle elle est noyée. Le principe de fonctionnement des réseaux de Bragg a déjà été présenté en détail dans plusieurs articles parus au cours des 15 dernières années [5-6].

Nous avons équipé un démonstrateur représentatif de la structure alvéolaire étudiée de plusieurs fibres à RB. Cet article relate nos tests d'intégration de ces capteurs optiques dans le détecteur, la campagne expérimentale de mesure sur banc et la comparaison des résultats obtenus à des simulations mécaniques.

## 2. Présentation du démonstrateur

Pour disposer correctement les capteurs, une analyse structurale sur le code de calcul ANSYS a permis de préciser la nature de la déformation de la structure dans plusieurs cas de

chargement statiques, représentatifs des différents positionnements des modules dans le détecteur. Les résultats ont aussi permis de localiser les contraintes limites : elles sont toujours situées sensiblement à proximité du système de fixation (rails métalliques) au niveau des toiles inter-alvéolaires (Figure 2).



*Figure 2 : Localisation des contraintes critiques dans la structure alvéolaire FC/W pour un cas de chargement sous le poids propre du module.*

Nous avons donc défini le démonstrateur de cette étude comme étant une structure représentant la couche d'alvéoles du module proche du système de fixation. Sa longueur est de 1500 mm, ce qui est typique d'une structure finale. Nous nous sommes limités à une structure composée de 3 alvéoles au lieu des 5 prévues, ce qui permet cependant d'incorporer 2 fibres optiques indépendantes possédant les RB. La localisation de ceux-ci est définie par les résultats de simulation, c'est-à-dire sous les rails de fixations (Figure 2). Afin de compléter les mesures, nous avons aussi placé 2 RB supplémentaires à équidistance des 3 rails. Au final, chacune des fibres possède 5 RB disposés en série.

Le démonstrateur ainsi défini a été obtenu par une cuisson en autoclave de pré-imprégnés de tissu carbone et de résine époxy. La mise en œuvre d'un tel procédé est délicate : elle nécessite une manipulation manuelle de la fibre lors de la phase de drapage des tissus (Figure 3) et les zones où sont localisés les RB sont très fragiles car exemptes de gaine de protection pour assurer une meilleure interface fibre/matière. La mise en place manuelle des fibres génère aussi des erreurs de positionnements des RB qui peuvent être estimées à  $\pm 1$  mm. Enfin, lors de la phase de polymérisation, des contraintes résiduelles de cuisson peuvent apparaître, qui modifient les valeurs initiales des longueurs d'ondes de Bragg, et donc le comportement de la fibre par rapport à sa calibration initiale [6-7].

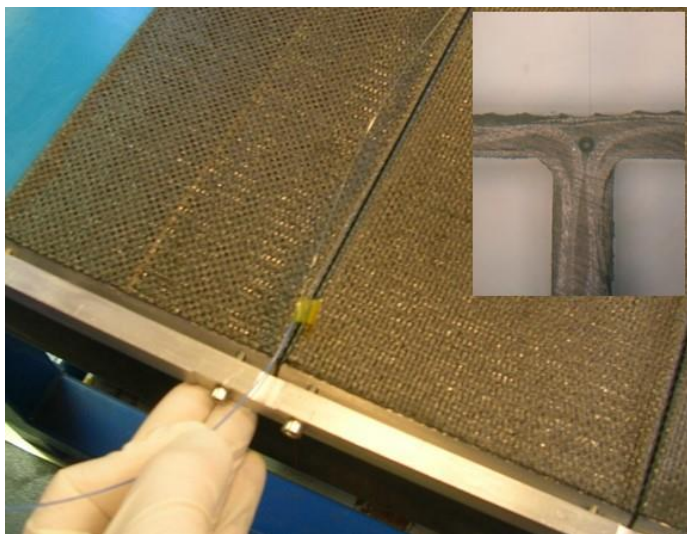


Figure 3 : Mise en place manuelle de la fibre entre 2 plis de composite du renfort.

### 3. Mesures Expérimentales

Un banc d'essais de flexion 3 point a été spécifiquement mis au point afin de pouvoir appliquer sur le démonstrateur plusieurs cas de chargement (Figure 4). Une charge  $M_i$  est appliquée au centre d'appuis distants de 800 mm.

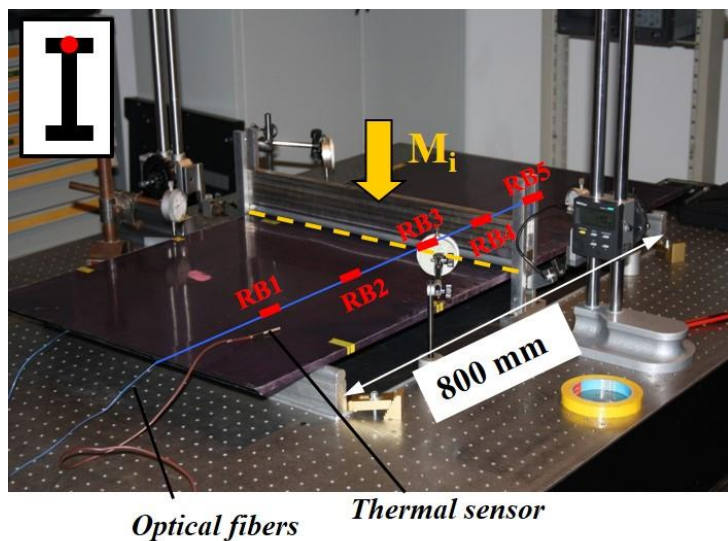


Figure 4 : Banc de flexion 3 points.

La flèche globale ainsi que la mesure des variations de longueurs de Bragg  $\Delta\lambda_b$  de chaque RB sont alors enregistrés (Figure 5) à l'aide d'un interrogateur en longueurs d'onde de Bragg à balayage laser permettant des mesures statique et dynamique (Micron Optics SI425).

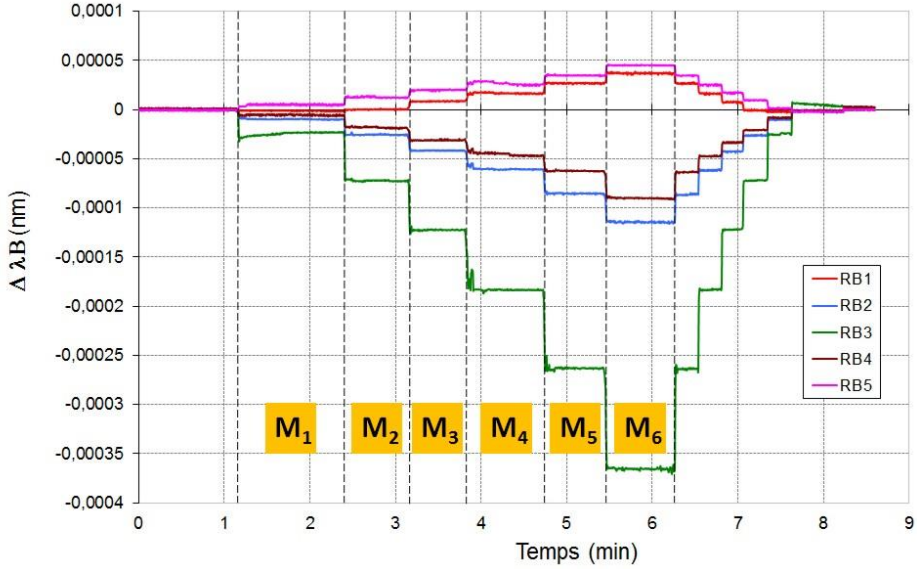


Figure 5 : Evolution de la longueur de Bragg des 5 RB en fonction des 6 cas de chargement

Les résultats expérimentaux montrent une bonne sensibilité. En effet, dès le premier chargement (M1), de très faibles variations de la longueur d'onde de Bragg sont enregistrées, avec une résolution de  $6 \cdot 10^{-7}$  nm (figure 5). En supposant la température constante et en négligeant les perturbations autres que celles présentes le long des fibres, les valeurs des allongements expérimentaux  $\varepsilon_{yy}$  sont obtenues par la formule :

$$\varepsilon_{yy} = b \Delta\lambda_b / \lambda_b, \quad \text{avec } b \sim 0,78 \cdot 10^{-6} / \mu\text{m/m, qui est obtenu expérimentalement lors de la calibration des RB.}$$

Les résultats expérimentaux relatent le comportement symétrique attendu d'une structure soumis à un chargement de flexion 3 points. Le maximum d'allongement se situe au niveau de RB3, centre de la flexion, alors que RB2 et RB4 ont des allongements similaires, étant à des distances identiques des appuis. Les variations au niveau de RB1 et RB5 sont faibles, celles-ci se situant directement au niveau des appuis. Les variations de longueur de Bragg pour RB2, RB3 et RB4 sont négatives, ce qui indique un comportement en compression du matériau. En revanche, RB1 et RB5, indiquent des variations positives.

4. Résultats numériques

Le modèle numérique est fondé sur un modèle de type coque, en prenant en compte cependant l'empilement des plis et les orientations des tissus. Des tests destructifs en traction sur des éprouvettes en composite, réalisées en même temps que le démonstrateur, nous ont permis d'obtenir le jeu de paramètres propre pour nos calculs. Les cas de chargements sont appliqués de façon identique au niveau du renfort interface du modèle. Les conditions aux limites reprennent les appuis du banc d'essais.

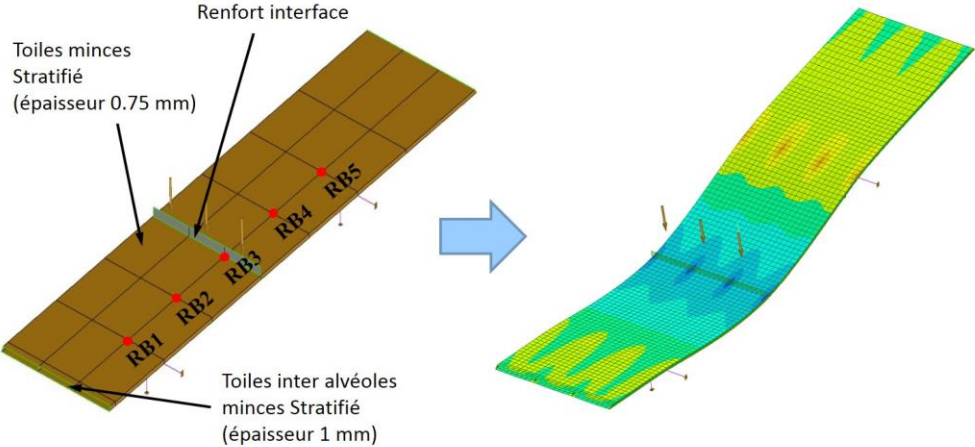


Figure 6 : Modèle numérique et un résultat de simulation.

Nous obtenons les  $\epsilon_{yy}$  calculés à partir des valeurs scalaires de la seconde composante du tenseur des déformations. Le tableau 1 synthétise l'ensemble de nos résultats expérimentaux et numériques.

	Poids (N)	$\epsilon_{yy}$ RB1 ( $\mu\text{m/m}$ )		$\epsilon_{yy}$ RB2 ( $\mu\text{m/m}$ )		$\epsilon_{yy}$ RB3 ( $\mu\text{m/m}$ )		$\epsilon_{yy}$ RB4 ( $\mu\text{m/m}$ )		$\epsilon_{yy}$ RB5 ( $\mu\text{m/m}$ )	
		Exp.	Simu.	Exp.	Simu.	Exp.	Simu.	Exp.	Simu.	Exp.	Simu.
M1	9,4	-2,5	14,0	-12,6	-12,2	-29,9	-36,8	-7,4	-8,1	4,9	29,0
M2	26,4	0,8	27,8	-32,8	-30,6	-92,9	-100,7	-24,7	-26,5	15,6	42,5
M3	43,3	10,9	41,1	-53,8	-49,1	-156,8	-165,6	-39,6	-44,9	26,2	55,8
M4	61,6	21,0	55,4	-78,2	-69,0	-235,6	-237,0	-59,3	-64,8	31,1	70,0
M5	82,1	33,6	71,5	-109,3	-91,4	-336,8	-319,6	-79,9	-87,1	44,2	86,2
M6	102,5	48,7	87,4	-145,4	-117,7	-468,7	-413,7	-115,4	-112,8	58,1	102,2

On observe une déformation quadratique avec le poids, reproduite par la simulation numérique avec une précision meilleure que 20% (figure 7). Le comportement en déformation en flexion 3 points du démonstrateur semble donc être bien modélisé entre les 2 appuis. Cependant, concernant les 2 RB se situant au niveau des appuis (RB1 et RB5), les différences entre les résultats expérimentaux et la simulation sont plus prononcées. Il semble en effet, qu'à faible déformée, les erreurs de positionnement des RB peuvent avoir une plus forte influence. De plus, nous n'avons pas pris en compte les déformées secondaires ou celles qui sont résiduelles de la cuisson, en l'absence d'un système de suivi. Le comportement reste cependant bien simulé puisque le phénomène de variation positive de longueur de Bragg aux extrémités est retrouvé, avec une différence de valeur entre les 2 appuis due à des longueurs différentes de la structure hors appui. Ce comportement en traction des RB peut s'expliquer en regardant la déformée du démonstrateur, qui s'inverse en raison du poids propre du celui-ci en dehors des appuis.

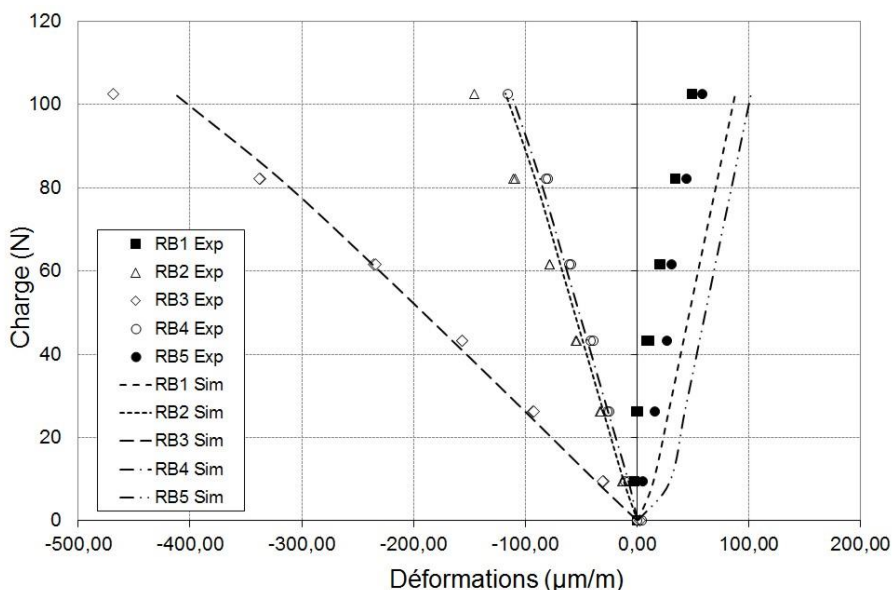


Figure 7 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

## 5. Conclusion

Nous avons réalisé une première étude de déformée d'une structure alvéolaire en matériau composite en fibre de carbone/tungstène en utilisant de nouveaux capteurs basés sur des réseaux de Bragg. L'avantage indéniable de ces capteurs réside dans la possibilité de les intégrer entre 2 plis de tissus composite. Ils permettent alors d'avoir des informations d'allongement et donc de contraintes in-situ. Grâce à leur taille réduite, les fibres optiques

utilisées ne perturbent pas le comportement mécanique de l'ensemble. Il faut cependant être sensible à la difficulté de les mettre en œuvre : leur fragilité, en particulier au niveau des réseaux, rend leur manipulation délicate.

Les déformations sous contrainte obtenues expérimentalement sont reproduites numériquement à mieux que 20%, y compris dans leur non linéarité. Il est prévu de poursuivre et de compléter cette étude par la réalisation d'un prototype technologique représentant la structure finale et équipé de fibres optiques. Cette deuxième étape devrait confirmer la pertinence d'utiliser de ce type de capteur pour notre futur détecteur.

## 6. Bibliographie

- [1] Behnke T, et al. The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors", arXiv:1306.6329 [physics.ins-det].
- [2] The CEPC-SPPC Study Group, "CEPC-SppC Preliminary Conceptual Design Report - Volume I," report IHEP-CEPC-DR-2015-01; IHEP-EP-2015-01; IHEP-TH-2015-01, IHEP, January, 2015. [http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/main\\_preCDR.pdf](http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/main_preCDR.pdf).
- [3] The CALICE collaboration, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CALICE/WebHome>
- [4] The CALICE collaboration, Repond J, et al. Design and Electronics Commissioning of the Physics Prototype of a Si-W Electromagnetic Calorimeter for the International Linear Collider, J. Instrum. 3 P08001, arXiv:0805.4833v1 [physics.ins-det] ; 2008
- [5] Kuang KSC, Kenny R, Whelan MP, Cantwell WJ, Chalker PR. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials, Composites Science and Technology, Vol. 61, pp. 1379-1387; 2001.
- [6] Rao YJ In-fibre Bragg grating sensors, Measurements Sciences and Technology, Vol. 8, pp. 355–375 ; 1997.
- [7] Mulle M, et al. Assessment of cure-residual strains through the thickness of carbon–epoxy laminates using FBGs Part II: Technological specimen, Composites: Part A 40 1534–1544 ; 2009